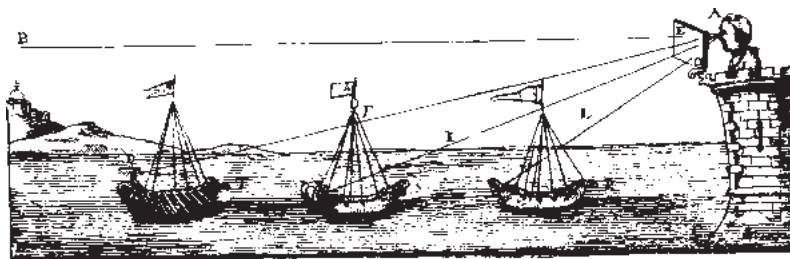


INVESTIGACIÓN DIDÁCTICA



PENSAMIENTO INTUITIVO EN QUÍMICA: SUPOSICIONES IMPLÍCITAS Y REGLAS HEURÍSTICAS

TALANQUER, VICENTE

Department of Chemistry and Biochemistry. University of Arizona, Tucson
vicente@u.arizona.edu

Resumen. El objetivo central de este trabajo es el de ilustrar en qué medida el razonamiento de los estudiantes de ciencias, en particular de los alumnos de química, puede estar restringido por suposiciones implícitas sobre las propiedades y el comportamiento de las entidades en un sistema, o por atajos de razonamiento (heurísticos) que les ayudan a disminuir el esfuerzo cognitivo. Los resultados de nuestras investigaciones indican de manera consistente que, aun a nivel universitario, el pensamiento de los estudiantes está dominado por conocimientos y formas de razonamiento intuitivos. Desde esta perspectiva, cualquier agenda en la educación de las ciencias que se privilegie debe reconocer la importancia de crear oportunidades en el aula para cuestionar y reflexionar sobre los alcances y limitaciones de estas formas de pensar.

Palabras clave. Aprendizaje de la química, cambio conceptual, heurísticos, pensamiento intuitivo, restricciones cognitivas, suposiciones implícitas.

Intuitive Thinking in Chemistry: Implicit Assumptions and Heuristics

Summary. The central goal of this work is to illustrate the extent to which science students' reasoning is constrained by a) *implicit assumptions* about the properties and behavior of the relevant entities in the domain, and b) shortcut reasoning procedures (*heuristics*) in order to build explanations, generate inferences, and make predictions and decisions with limited time and knowledge. Results from our research consistently suggest that, even at college level, students' thinking is largely controlled by these types of cognitive constraints. Solving problems, generating explanations, or building inferences seems to involve the activation or instantiation of a spectrum of constraints, from domain-general to domain-specific, from implicit to explicit, which may act in complementary or competitive ways. The goal is not necessarily to achieve conceptual coherence, but rather local explanatory coherence during a specific task in a determined context. The characterization of students' intuitive thinking is thus of central importance in the development of curriculum and teaching strategies that better support student learning in science, as well as in the design of assessment tools to gather valid evidence of student understanding.

Keywords. Chemistry learning, cognitive constraints, conceptual change, heuristics, implicit assumptions, intuitive thinking.

INTRODUCCIÓN

Mucho se ha escrito sobre los retos que afronta la enseñanza del las ciencias en las sociedades modernas (AAAS, 1989; Black y Atkin, 1996; Millar y Osborne, 1998). Los avances científicos y tecnológicos de los últimos 100 años han tenido un impacto fundamental en nuestra forma y calidad de vida, y han comenzado a transformar la faz del planeta. Por ello, hoy día se considera indispensable que los ciudadanos del mundo posean conocimientos básicos de ciencia, y sobre la naturaleza de la ciencia, que les permitan tanto analizar las problemáticas sociales y ambientales con las que nos enfrentamos, como tomar decisiones personales y colectivas que favorezcan el desarrollo sustentable. Sin embargo, no es del todo claro qué tipo de conocimientos y competencias básicas deben constituir el corazón de la enseñanza científica actual. ¿Debemos enfatizar las ideas centrales en cada disciplina o sus aplicaciones más relevantes? ¿Quizá fuera mejor enfocar nuestros esfuerzos a la creación de oportunidades para la exploración inquisitiva en las aulas, el desarrollo de modelos y la generación y evaluación de argumentos válidos en función de la evidencia disponible? ¿Es posible que fuera más adecuado analizar y discutir de manera explícita la naturaleza del trabajo científico y tecnológico, así como su impacto en la sociedad moderna?

Sean cuales sean las respuestas que demos a este tipo de preguntas, el éxito de las estrategias didácticas que se diseñen para implementar cualquier agenda educativa dependerá del nivel de comprensión que tengamos sobre los alcances y limitaciones del conocimiento y formas de pensar de nuestros estudiantes. De poco nos servirán las listas de estándares o competencias educativas que consideremos más deseables si no prestamos atención a los factores cognitivos que tanto apoyan como restringen el aprendizaje en el aula. En particular, las investigaciones en psicología cognitiva y enseñanza de las ciencias en los últimos 40 años han desvelado el papel central que las ideas y formas de pensar intuitivas de los estudiantes juegan en la construcción de aprendizajes significativos (Duit, 2007), ya sea cuando se trata de comprender conceptos científicos fundamentales, durante el diseño e implementación de experimentos, o en el proceso de construir modelos, argumentos y explicaciones para darle sentido a las propiedades y comportamiento de sistemas físicos y biológicos de interés.

De acuerdo con los resultados de las investigaciones mencionadas, la mente humana parece operar en función de una variedad de restricciones cognitivas que guían, pero también limitan, el aprendizaje y el razonamiento en un área dada (Keil, 1990; Hatano e Inagaki, 2000; Pozo y Gómez-Crespo, 1998; Wellman y Gelman, 1998). La resolución de problemas, la generación de explicaciones o la construcción de inferencias y predicciones involucra la activación de una variedad de restricciones cognitivas, de dominio-general a dominio-específico, de implícitas a explícitas, las cuales actúan en formas complementarias o competitivas (Sebastià, 1989; Gelman, 1990; Gelman y Williams, 1998). La meta no es necesariamente lograr coherencia conceptual global, sino coherencia local en la

generación de explicaciones durante una tarea dada en un contexto determinado (Sloman, 1996). Los sistemas de conocimiento restringidos nos permiten construir inferencias razonables sobre el comportamiento del mundo bajo condiciones inciertas, esto es, en situaciones en las que el tiempo y los conocimientos disponibles son limitados (Gigerenzer y Selten, 2001). Este tipo de sistemas generan respuestas razonables con poco esfuerzo cognitivo, pero en ocasiones son la causa de errores y prejuicios sistemáticos.

En años recientes hemos propuesto que muchas de las concepciones alternativas y errores sistemáticos de los estudiantes de ciencias parecen ser el resultado de razonamiento restringido en condiciones de incertidumbre (Talanquer, 2006, 2008, 2009). En particular hemos sugerido que, para propósitos de análisis, es conveniente concebir a las restricciones cognitivas que guían, pero también limitan, el pensamiento de nuestros alumnos de ciencias como pertenecientes a dos grandes clases: *a) Suposiciones implícitas* sobre las propiedades y el comportamiento de las entidades relevantes en un cierto dominio del conocimiento (p. ej., los objetos se mueven en trayectorias continuas; las diferentes partes de un ser vivo tienen propósitos específicos) y *b) Atajos de razonamiento (heurísticos)* para construir explicaciones, generar inferencias, hacer predicciones y tomar decisiones en condiciones de tiempo y conocimientos limitados (p. ej., cuando es necesario elegir entre dos opciones, si una es conocida, selecciona la opción más familiar). Diversos autores han enfatizado la importancia central que estos tipos de restricciones cognitivas tienen en el pensamiento de los estudiantes, refiriéndose a ellas de diferentes maneras: presuposiciones tácitas o implícitas (Vosniadou, 1994), hipótesis centrales (Chi, 2008), fenomenológicos primitivos (diSessa, 1993), recursos cognitivos (Redish, 2004), intuiciones centrales (Fischbein, 1987), razonamientos intuitivos (Viennot, 2001) o reglas intuitivas (Stavy y Tirosh, 2000).

El objetivo central del presente trabajo es el de ilustrar cómo la caracterización de las suposiciones intuitivas y reglas heurísticas de razonamiento que parecen restringir el pensamiento de los alumnos de ciencias nos permite entender de mejor manera el origen de las dificultades conceptuales y procedimentales que afrontan en nuestras clases. Este marco teórico también resulta de utilidad en el diseño de intervenciones y herramientas didácticas que ayuden a los estudiantes a desarrollar conocimientos y formas de razonamiento que vayan más allá del nivel de las intuiciones. Aunque los ejemplos que se presentan y discuten en las diferentes secciones de este artículo se derivan del trabajo de investigación realizado con estudiantes de química a nivel universitario, las ideas fundamentales que se discuten son relevantes en diferentes áreas y niveles educativos. Sin embargo, antes de discutir ejemplos específicos sobre lo que denominamos «pensamiento restringido» en química, es conveniente profundizar un poco más en las ideas fundamentales que guían nuestro trabajo.

RAZONAMIENTO DUAL

Las investigaciones sobre los conceptos e ideas alternativas de los estudiantes en ciencias comúnmente contrastan el conocimiento y razonamiento intuitivo de los alumnos con el conocimiento y razonamiento científico formal (Duit, 2007). El primero de ellos parece estar guiado por creencias o suposiciones implícitas sobre los objetos de la naturaleza los cuales se aplican de forma rápida, espontánea e indiscriminada, mientras que el conocimiento científico es resultado de un proceso analítico arduo, conciente y controlado. En gran medida, la diferencia entre razonamiento intuitivo y razonamiento científico es similar a la que algunos psicólogos cognitivos establecen entre las dos formas de razonar que dominan el pensamiento humano de acuerdo con la denominada hipótesis de proceso dual (Evans, 2008; Sloman, 1996).

La hipótesis de proceso dual propone que la mente humana posee dos modos principales de pensamiento o razonamiento, comúnmente identificados como Sistema 1 y Sistema 2, los cuales pueden operar en serie o en paralelo en nuestra mente. El primero de estos sistemas incluye procesos que son inconscientes, implícitos, automáticos, rápidos y de bajo costo cognitivo, mientras que los procesos en el Sistema 2 son concientes, explícitos, controlados, lentos y de alta demanda mental. Los procesos en el Sistema 2 requieren acceso a la memoria de trabajo, lo que no sucede con procesos del tipo 1. En este sentido, es de esperar que procesos del tipo 2 se correlacionen con diferencias individuales en capacidad cognitiva y se vean afectados por carga excesiva en la memoria de trabajo, mientras que los de tipo 1 no dependen del nivel de inteligencia general o de la capacidad de la memoria de trabajo.

Los modos de razonamiento asignados al Sistema 1 y al Sistema 2 corresponden, respectivamente, a las nociones coloquiales sobre pensamiento intuitivo y pensamiento analítico. Las restricciones cognitivas descritas en la introducción a este artículo están asociadas al Sistema 1, el cual produce respuestas automáticas no normativas, mientras que los procesos del Sistema 2 responden a las reglas de razonamiento formal. En general, se considera que las respuestas generadas por el Sistema 1 controlan el pensamiento humano a menos que el Sistema 2 intervenga con razonamiento de mayor demanda cognitiva (Evans, 2006). Sin embargo, la intervención del Sistema 2 con el fin de alterar o inhibir las respuestas espontáneas generadas por el Sistema 1, dependerá del grado en que dichas respuestas se juzguen no satisfactorias (esto es, se identifique una buena razón para rechazarlas). Este tipo de intervenciones serán más frecuentes cuando el individuo posea sólidos conocimientos en el área de interés, capacidad cognitiva elevada, o disposición al pensamiento crítico y reflexivo (Evans, 2008).

Los procesos de razonamiento asociados al Sistema 1 tienden a contextualizar los problemas haciendo uso de conocimientos previos, o de *suposiciones implícitas* sobre las propiedades y comportamiento del sistema de interés, los cuales son activados por los rasgos y me-

tas específicos de la tarea con la que nos enfrentamos (Evans, 2006). Esta activación involucra procedimientos «*heurísticos*» rápidos y frugales que simplifican la tarea, ya sea reduciendo la cantidad de información a procesar o proporcionando reglas empíricas para determinar cómo y dónde buscar información, cuándo detener la búsqueda y qué hacer con los resultados de este proceso (Todd y Gigerenzer, 2000).

Es de esperar que esta forma de razonamiento intuitivo introduzca variabilidad en las explicaciones y toma de decisiones de una sola persona o grupo de individuos, quienes pueden seleccionar diferentes pistas o indicadores para guiar su razonamiento sobre un fenómeno y generar por tanto diferentes explicaciones, aun cuando su pensamiento esté guiado por restricciones cognitivas similares. Por ejemplo, si dos niños observan la formación de gotas en el exterior de un vaso con agua fría, suposiciones implícitas sobre causalidad (Andersson, 1986) en combinación con reglas heurísticas de asociación (Einhorn y Hogarth, 1986) los llevarán a buscar una causa próxima en espacio y tiempo. Sin embargo, mientras uno de ellos puede proponer que el agua pasó a través de las paredes del vaso (contigüidad espacial), el otro puede sugerir que fue transferida por la persona que acaba de llenarlo con agua (contigüidad temporal). Veamos ahora cómo podemos aplicar estas ideas para explorar y analizar el razonamiento de los estudiantes en nuestros aulas de clase.

SUPOSICIONES Y HEURÍSTICOS

Con el fin de ilustrar las ideas introducidas en las secciones anteriores, analicemos los resultados de investigaciones que hemos realizado para explorar tanto las *suposiciones implícitas* como las *reglas heurísticas* comúnmente utilizadas por estudiantes de química a nivel universitario para dar respuestas a preguntas conceptuales en el salón de clases. En particular, en nuestro trabajo hemos encontrado que el análisis de las explicaciones o predicciones de los alumnos sobre las propiedades físicas y químicas de los materiales resulta de gran utilidad para investigar sus suposiciones implícitas sobre el comportamiento de la materia (Talanquer, 2008, 2009), mientras que el análisis de sus decisiones en el proceso de clasificar o comparar distintas sustancias en función de su composición química y estructura molecular revela información importante sobre sus patrones heurísticos de razonamiento (Stains y Talanquer, 2007, 2008). Es importante señalar que nuestro interés central no es el de identificar concepciones alternativas específicas en un tema dado, sino desvelar las ideas y patrones de razonamiento subyacentes que guían las inferencias y decisiones de los estudiantes.

Explicaciones: En busca de suposiciones

El análisis de cambios en las propiedades físicas de las sustancias, tales como su punto de ebullición y fusión, cuando se mezclan con otros materiales proporciona una excelen-

te oportunidad para explorar las suposiciones implícitas de los estudiantes sobre las causas de dichos cambios. En particular, el análisis de sus explicaciones sobre propiedades que tan sólo dependen de la proporción relativa de partículas de soluto a partículas de disolvente, y no de la identidad química de la sustancia añadida (propiedades coligativas), es de interés dado su carácter «emergente», esto es, dado que no resultan de la simple combinación de las propiedades de los componentes individuales (a diferencia de propiedades «aditivas», como la masa).

Desde el punto de vista de la teoría cinéticomolecular, las propiedades coligativas emergen a partir de cambios en las probabilidades de transferencia aleatoria de las partículas de disolvente desde la disolución líquida a cualquier otra fase en la que el soluto no esté presente. En particular, las partículas de soluto se encontrarán distribuidas aleatoriamente en la interfase del sistema, disminuyendo la probabilidad de que las partículas de disolvente ocupen tales espacios. Dado que el soluto no afecta a la rapidez de transferencia de partículas de disolvente desde la fase pura (gas, sólido, o disolvente puro en el caso de ósmosis) hacia la disolución, el equilibrio entre los procesos de intercambio de partículas entre las dos fases ocurre a diferentes temperaturas o presiones que en muestras puras.

Para investigar las suposiciones implícitas de los estudiantes sobre estos fenómenos, preparamos un cuestionario en el que, entre otras preguntas, solicitamos una explicación al hecho de que el punto de ebullición de una solución de agua con sal (cloruro de sodio) es más alto que el del agua pura. Esta pregunta fue respondida por 391 estudiantes de ciencias e ingenierías al final del segundo, y último, semestre del curso de Química General en nuestra universidad. Es importante aclarar que aunque el tema de propiedades coligativas no se cubre explícitamente en este curso, las ideas y modelos que permiten generar explicaciones plausibles (modelo cinéticomolecular; propiedades termodinámicas) se discuten ampliamente en el aula de clase.

El análisis de las respuestas de los estudiantes reveló la existencia de dos formas dominantes de explicación para la elevación del punto de ebullición del agua, las cuales pueden denominarse «causal-aditiva» (42,7%) y «causal-estática» (36,1%). En las explicaciones de tipo causal-aditiva los estudiantes implícitamente asumieron que las propiedades de una mezcla de componentes eran aditivas, y que esto explicaba los cambios observados. Por ejemplo, algunos de ellos se refirieron al incremento de la cantidad de materia o sustancias en el sistema, haciendo mención a la concentración, densidad, o viscosidad de la disolución:

«Esto es porque ahora hay más sustancias en el agua, lo que la hace más espesa, por lo que hierve a más altas temperaturas.»

Otros estudiantes prestaron atención a las propiedades específicas del cloruro de sodio, en particular sus altos puntos de fusión y ebullición, asumiendo que estas propiedades de alguna manera se promediaban con las del agua:

«NaCl por sí mismo tiene un punto de ebullición mucho más alto que el del agua; por tanto, aun pequeñas cantidades de sal pueden elevar el punto de ebullición.»

La mayor parte de los estudiantes que generó explicaciones causales-aditivas (32,5%) se refirió, de alguna forma u otra, a los componentes submicroscópicos de la mezcla. Sin embargo, estas respuestas implicaban que el cambio podía explicarse prestando atención a las propiedades de las partículas de soluto añadidas (p. ej., masa o tamaño más grande, puntos de ebullición más elevados, mayor polaridad, carácter iónico):

«La adición de iones de NaCl es más materia que necesita ser transformada en gas cuando el agua hierve.»
«Las moléculas de Na y Cl son más grandes que las moléculas de agua, por lo que toma más tiempo incrementar su energía cinética.»
«Contiene Na⁺, Cl⁻, los cuales son iones. Los iones siempre tienen puntos de ebullición más elevados.»

o a la fuerza del enlace en NaCl y a la energía necesaria para romperlo, lo que sugiere que muchos estudiantes consideraron que NaCl no se disociaba en el agua:

«Ebulle a una temperatura mayor porque las moléculas de NaCl están fuertemente enlazadas, por lo que se requiere más energía para separarlas.»
«Porque requiere más energía romper los enlaces en NaCl que la que se necesita con agua pura; el calor tiene que romper los enlaces en NaCl y los puentes de hidrógeno.»

Por otro lado, los estudiantes que construyeron explicaciones causales-estáticas consideraron que la elevación del punto de ebullición podía explicarse tomando en cuenta las fuerzas entre las partículas en el sistema, sin ninguna referencia a su movimiento aleatorio. En particular, los alumnos que generaron este tipo de explicaciones atribuyeron el cambio en punto de ebullición a incrementos ya sea en la magnitud o en el número de interacciones entre las partículas en el sistema. En la mayoría de los casos, los estudiantes se refirieron específicamente a las interacciones entre partículas de NaCl y H₂O como la causa principal del fenómeno:

«Las fuerzas atractivas entre el agua y los iones Na⁺ y Cl⁻ también deben romperse.»
«Las moléculas de sodio y cloro tienen una alta afinidad por el agua, creando enlaces más fuertes que requieren más energía (calor) para romperse.»

Resultados similares se obtuvieron durante el análisis de las respuestas de los estudiantes para explicar la disminución en el punto de congelación de una disolución de agua y azúcar. En este caso 23,9% de los estudiantes generó explicaciones causales-aditivas y 40,8% produjo explicaciones causales-estáticas. En ningún caso se encontraron estudiantes que explicaran estos fenómenos haciendo referencia al movimiento y transferencia aleatorios de partículas entre las dos fases presentes en el sistema. Este tipo de explicaciones «causales-dinámicas» no parecen formar parte del repertorio de explicaciones que los estudiantes de química imaginan o consideran plausibles.

El análisis del tipo de explicaciones causales generadas por los participantes en nuestro estudio sugiere que los estudiantes parecen tener preferencia por ciertos tipos de modelos causales o modos de explicación. Por un lado, una alta proporción de ellos tiene la tendencia a asumir que todas las propiedades físicas y químicas de las sustancias y sus mezclas son el resultado del promedio ponderado de las propiedades de sus componentes individuales. Esta *suposición* «aditiva» se manifiesta en una gran variedad de contextos (Talanquer, 2006, 2008). Por otro lado, el dominio de las explicaciones causales-estáticas es indicativo de la tendencia a asumir que todo cambio puede ser justificado por la acción de agentes estáticos que ejercen fuerzas sobre las diversas entidades que los rodean. Esta *suposición* de «acción causal determinista centralizada» ha sido también identificada por otros autores como característica del razonamiento intuitivo de los estudiantes (Andersson, 1986; Driver; Guesne y Tiberghien, 1985; Gutierrez y Ogborn, 1992; Grotzer, 2003; Perkins y Grotzer, 2005; Viennot, 2001).

Resnick (1994) ha sugerido que las personas en general tienen la tendencia a adoptar una forma de «pensamiento centralizado» cuando generan explicaciones sobre patrones, estructuras y eventos en el mundo. Esto implica que tienden a buscar el agente activo o motor que ejerce cierto tipo de control central sobre los fenómenos. Estos agentes tienden a asumir los roles de «líderes» capaces de orquestar eventos, o de «semillas» que de manera más pasiva crean las condiciones subyacentes que le dan forma a los fenómenos. En cierta medida, nuestros resultados revelan que muchos estudiantes en nuestro estudio consideraron al NaCl como un «líder» capaz de prevenir la ebullición y al azúcar como una «semilla» que inhibe la congelación del agua. Dado el predominio de las explicaciones causales-aditivas en nuestros resultados, sugeriríamos que las personas de manera intuitiva también tienen la tendencia a pensar en los agentes de cambio como «portadores» de cualidades que pueden añadir, realzar o diluir ciertas propiedades y comportamientos por su mera adición al sistema.

Comparaciones: En busca de heurísticos

Para ilustrar el tipo de reglas heurísticas de razonamiento utilizadas por estudiantes de química para responder preguntas en el aula de clases, consideremos ahora los resultados de una investigación en la que se analizaron las respuestas y justificaciones de alumnos del segundo semestre de química general a quienes se les pidió ordenar una serie de compuestos químicos en orden creciente del valor esperado de propiedades como solubilidad en agua, punto de ebullición o acidez. En particular, consideremos los resultados del análisis de las respuestas y justificaciones a la pregunta «Ordena los siguientes compuestos químicos en orden creciente de solubilidad en agua: NaCl, NaBr, MgO, BaO», los cuales son representativos de los resultados generales de dicha investigación. Esta pregunta fue respondida por $N = 405$ estudiantes universitarios, 34 de los cuales fueron entrevistados con el fin de registrar su justificación a la respuesta que proporcionaron. Sin embargo, antes de describir la naturaleza de los heurísticos

identificados, resulta útil ilustrar el tipo de razonamiento analítico que sería necesario utilizar para producir una respuesta satisfactoria a esta pregunta.

La investigación sobre procesos de juicio y toma de decisiones sugiere que la búsqueda de decisiones óptimas puede ser modelada haciendo uso de la regla aditiva ponderada (Shah y Oppenheimer, 2008). De acuerdo con este modelo, el pensador analítico considera y evalúa todas las alternativas posibles así como los indicadores relevantes para cada alternativa. Por ejemplo, para dar respuesta a la pregunta de interés en este trabajo el modelo sugiere que la generación de la respuesta correcta requiere invertir esfuerzo en cinco tareas básicas:

1. *Identificación de todos los indicadores relevantes* (p. ej., reconocer que todos los compuestos son iónicos y que sus propiedades físicas están principalmente determinadas por el tamaño y carga de sus iones);

2. *Recuerdo del valor de tales indicadores* (p. ej. Na^+ , Cl^- y Br^- son iones univalentes; Mg^{2+} , Ba^{2+} y O^{2-} son iones divalentes; el tamaño de los iones se incrementa de arriba abajo en la tabla periódica).

3. *Evaluación de la influencia relativa de cada indicador* (p. ej., en la mayoría de los compuestos iónicos con iones monoatómicos, la solubilidad en agua es mayor cuanto más débil sea la interacción entre iones; la magnitud de esta interacción está determinada por la ley de Coulomb; cuanto menor sea la carga y mayor sea el tamaño del ión, más débil será la interacción; diferencias en la carga de los iones tienen un mayor impacto sobre las propiedades físicas de los compuestos que diferencias en sus tamaños).

4. *Integración de la información para las diferentes alternativas* (p. ej., las interacciones entre iones en NaCl y NaBr son más débiles que las presentes en MgO y BaO; las interacciones entre iones son más débiles en NaBr que en NaCl; las interacciones entre iones son más débiles en BaO que en MgO. Aunque el ión O^{2-} reaccionará con agua para formar OH^- , este hecho no afectará mucho a la solubilidad relativa).

5. *Comparación de diferentes alternativas y toma de decisiones* (p. ej., la solubilidad en agua seguramente se incrementa de MgO a BaO a NaCl a NaBr).

Es de esperar que este tipo de razonamiento demande un gran esfuerzo cognitivo por parte de los estudiantes. Quizá esto explique por qué sólo 5,4% de los alumnos que respondieron la pregunta y 11,8% de los entrevistados fueron capaces de generar la respuesta correcta, a pesar de que el conocimiento relevante para completar la tarea fue cubierto en su curso de química general. Nuestros resultados indican que la mayoría de los entrevistados utilizó heurísticos que les facilitaron la tarea, pero que normalmente los llevaron por caminos equivocados. Tal y como lo sugiere el modelo aditivo ponderado para la toma óptima de decisiones (Shah y Oppenheimer, 2008), los tipos de estrategias utilizadas por los estudiantes típicamente involucraron alguna de las siguientes estrategias para reducir esfuerzo cognitivo: evaluación de

menos indicadores de los necesarios, reducción en la dificultad para recordar los valores de indicadores relevantes, simplificación de principios para sopesar la influencia de diferentes indicadores, integración de menos información de la necesaria o evaluación de sólo unas cuantas alternativas.

De forma particular, nuestro análisis de las respuestas al cuestionario y de las justificaciones durante las entrevistas reveló que muchos de los participantes utilizaron uno o más de los siguientes heurísticos para tomar sus decisiones: *Reconocimiento*, *Representatividad*, *Una-Razón-Basta* y *Propiedad Periódica*. Las primeras tres estrategias pueden caracterizarse como de dominio-general en la medida que han sido identificadas en otras áreas del conocimiento (Gilovich, Griffin, y Kahneman, 2002), mientras que la cuarta regla heurística es específica del área de la química. Analicemos cada una de ellas con detalle.

Reconocimiento. Consideremos las respuestas de los estudiantes a la tarea de comparar las solubilidades de diferentes sustancias en agua tanto para el cuestionario ($N = 405$) como la entrevista ($N = 34$); estos resultados se resumen en la figura 1. Como podemos ver, las dos secuencias de sustancias más comúnmente propuestas por los estudiantes están caracterizadas por la selección de NaCl como la sustancia más soluble; de hecho, más del 73% de los estudiantes que contestaron el cuestionario o participaron en la entrevista tomó esta decisión. Los siguientes fragmentos de entrevistas ilustran el tipo de razonamiento utilizado por los entrevistados para justificar esta selección:

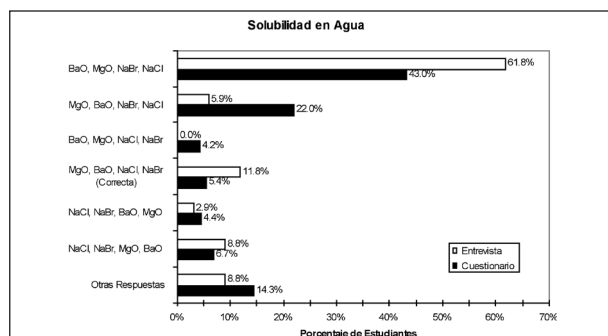
«Ok, Hum, NaCl es soluble, Hum, NaBr...hmm. NaCl y NaBr. Creo que NaCl es más soluble sólo por mi experiencia con él.»

«... Voy a poner NaCl primero sólo porque es sal.»

«Hum, sé que NaCl es soluble, sólo por lo que sé.... Por tanto pienso que NaCl es el más soluble.»

Figura 1

Secuencias de sustancias en orden creciente de solubilidad en agua propuestas por los participantes en nuestro estudio. La figura incluye los resultados obtenidos con el cuestionario ($N = 405$) y durante las entrevistas ($N = 34$).



El reconocimiento de NaCl como una sustancia soluble en agua jugó un papel central en la toma de decisiones de los entrevistados y, como lo ilustraremos más adelante, sirvió

de ancla para la elaboración de subsiguientes juicios a lo largo de la tarea. Nuestros resultados sugieren que la selección de NaCl como el compuesto más soluble seguramente se basó en un *heurístico de Reconocimiento* de la forma: «Si uno entre varios objetos es reconocido, entonces infiere que este objeto tiene el mayor valor de acuerdo con el criterio de interés» (Goldstein y Gigerenzer, 2002). En general, este tipo de heurístico utiliza el reconocimiento de una entidad u objeto como el indicador de base para la toma de decisiones, particularmente cuando se percibe que hay una fuerte correlación entre lo que se reconoce (sal) y la propiedad que se juzga (solubilidad en agua). Esta correlación es establecida y reforzada por la experiencia. Este tipo de heurístico está íntimamente relacionado con otros atajos de razonamiento, como familiaridad y disponibilidad (Gilovich, Griffin, y Kahneman, 2002), los cuales descansan en el uso de información que es reconocida, familiar o fácilmente procesada para tomar decisiones o construir inferencias. Este tipo de estrategias reducen la demanda cognitiva al disminuir el número de indicadores a tomar en cuenta y facilitar el proceso de recordar sus valores.

Representatividad. Si analizamos de nuevo las respuestas de los estudiantes que se presentan en la figura 1, notaremos que las dos secuencias más comúnmente propuestas incluyen NaBr como la sustancia que sigue al NaCl en términos de solubilidad en agua. Analicemos el tipo de razonamiento utilizado por nuestros entrevistados para justificar sus respuestas:

«Supongo que pondré, es decir, sin saber ninguna de las reglas, pondré NaBr por debajo de NaCl porque está relacionado con sodio.»

«Hum, ¿NaBr? Bien, porque pensé que esos dos son muy similares. NaCl sólo por experiencia pienso sería el más soluble y NaBr sería el siguiente que es más soluble.»

«...entonces voy a decir que NaCl es el más soluble y entonces, dado que creo que el sodio es definitivamente muy soluble, voy a decir que el bromo es el siguiente.»

Estos extractos ilustran la aplicación de otra estrategia de razonamiento comúnmente utilizada por los participantes en nuestro estudio, la cual puede identificarse como el heurístico de *Representatividad*. Este atajo de razonamiento se basa en la suposición de que existen similitudes en las propiedades y comportamientos de objetos que tienen apariencias similares (Gilovich, Griffin, y Kahneman, 2002), y ayuda a las personas a reducir el número de indicadores a considerar al tomar una decisión (p. ej., ignorar tamaño y carga de los iones), reducir la dificultad de recordar valores para tales indicadores (p. ej., evitar la comparación del tamaño de los iones Cl⁻ and Br⁻) e integrar menos información (p. ej., evitar la comparación entre NaBr y MgO o BaO). La aplicación de esta estrategia, de manera similar a como sucede con el heurístico de *Reconocimiento*, depende de la naturaleza de la tarea a la que uno se enfrenta (esto es, estos heurísticos sólo son útiles si hay objetos que se reconocen o que tienen apariencias similares). Nuestros resultados indican que los participantes en nuestro estudio siempre utilizaron el heurístico de *Representatividad* en combinación con otros atajos de razonamiento tales como *Reconocimiento*, lo que les permitió primero identificar una sustancia como

la más o menos soluble y después utilizarla como ancla o referencia para tomar el resto de sus decisiones.

Una-Razón-Basta. El análisis de las secuencias propuestas por los estudiantes para la solubilidad de compuestos en agua (Figura 1) revela que el arreglo: BaO, MgO, NaBr, NaCl fue claramente preferido por la mayoría de los participantes en el estudio. Dada la discusión presentada en las secciones anteriores, es posible que entendamos por qué NaCl y NaBr fueron comúnmente colocados en el extremo superior de la escala. Sin embargo, ¿qué tipo de razonamiento podría haber llevado a los estudiantes a pensar que MgO es más soluble que BaO? Consideremos los siguientes dos fragmentos de nuestras entrevistas:

«...Después de éstos siguen óxido de magnesio y óxido de bario. Hum. Éstos están acá [en la tabla periódica]. Para la solubilidad en agua, yo diría que el magnesio es el siguiente porque es más ligero y pienso que está más cerca del oxígeno y el hidrógeno, que es de lo que se compone el agua, así que puede encajar mejor en el agua.»

«...Entonces, MgO y BaO. Hum, pienso que MgO sería más soluble porque tiene átomos más pequeños y aunque no sé si eso tiene algo que ver con solubilidad pero, hum...sería capaz de enlazarse al agua...como con las moléculas de H₂O. Y pienso que BaO, no sé, estaría mejor solo. Hum, no sé. No puedo pensar en una razón diferente salvo que Mg y Ba están lejos en su grupo y eso implica una gran diferencia de tamaños, y el tamaño afectaría a si la molécula de agua puede disociarlos o no.»

En estos dos ejemplos los estudiantes basaron su decisión en la identificación de una sola característica diferenciadora entre las sustancias evaluadas, la cual de alguna forma les permitió hacer una distinción con respecto al criterio relevante (solubilidad en agua). En esta tarea en particular, el tamaño, el peso, o la electronegatividad de los átomos de Mg y Ba fueron los factores diferenciadores más comúnmente citados por los estudiantes, con una fuerte tendencia a asociar bajas solubilidades ya sea con tamaños y pesos atómicos elevados, o con bajas electronegatividades.

Estos resultados ilustran el uso del heurístico que denominamos *Una-Razón-Basta*, un atajo de razonamiento que ayuda a la gente a seleccionar entre varias opciones en función del primer indicador identificado que les permite seleccionar una alternativa sobre la otra (Todd y Gigerenzer, 2000). Este heurístico reduce el número de indicadores y alternativas que hay que considerar al tomar una decisión. Esta estrategia se utiliza comúnmente en combinación con reglas simples para decidir cuándo parar la búsqueda de indicadores y cómo tomar la decisión final. En nuestro estudio, la mayoría de los estudiantes que utilizaron este heurístico detuvieron la búsqueda cuando identificaron un indicador que de alguna manera pudieron asociar a la propiedad comparada (solubilidad en agua), ya sea en función de conocimientos previos, experiencia o intuición. Si el indicador que seleccionaron sólo les ayudaba a diferenciar entre dos sustancias en la serie, entonces la búsqueda de indicadores se iniciaba de nuevo, repitiendo el proceso hasta completar la secuencia.

Los participantes que aplicaron el heurístico *Una-Razón-Basta* para tomar sus decisiones frecuentemente utilizaron otros atajos cognitivos, tales como la regla «Más A-Más B» o «Mismo A-Mismo B» (Stavy y Tirosh, 2000), para construir asociaciones entre el indicador seleccionado y la propiedad comparada. Por ejemplo, los alumnos entrevistados tendieron a asociar grandes masas y tamaños atómicos con gran resistencia al cambio, y alta electronegatividad con gran polaridad. Debe reconocerse que los químicos expertos de hecho utilizan una gran variedad de reglas asociativas para hacer predicciones; estas reglas relacionan la composición y estructura molecular de las sustancias con sus propiedades físicas y químicas. Lo que nuestro estudio reveló es que aunque los estudiantes entrevistados también usaron reglas asociativas como estrategia básica para comparar las propiedades de compuestos químicos, frecuentemente construyeron asociaciones incorrectas o las usaron de manera inapropiada.

Propiedad periódica. Prestemos atención de nuevo a la secuencia más comúnmente propuesta por los estudiantes que respondieron a la pregunta sobre la solubilidad relativa de diferentes compuestos en agua: BaO, MgO, NaBr, NaCl (ver figura 1), y analicemos ahora las siguientes justificaciones para colocar el BaO al principio de la secuencia:

«Entonces, pienso que el menos soluble es BaO porque está más abajo en la tabla periódica que Mg, el cual está más arriba que NaBr que es un poco menos fuerte que NaCl.»

«Hum, el cloro está por arriba del bromo en la tabla periódica, y pienso que el cloruro de sodio es realmente soluble y pienso que es más soluble que el NaBr, entonces... Cl está arriba de Br...entonces pienso que el magnesio está arriba del bario y entonces será más soluble.»

Estos estudiantes basaron sus decisiones considerando la posición relativa en la tabla periódica de los diferentes átomos presentes en las sustancias comparadas, junto con la supuesta existencia de algún tipo de propiedad periódica no claramente definida. Este uso de la posición relativa de átomos individuales en la tabla periódica, combinado con la creación de una propiedad periódica arbitraria, fue utilizado con frecuencia por nuestros entrevistados al tomar decisiones. Esta estrategia, denominada heurístico de *Propiedad periódica*, le permitió a los alumnos reducir tanto el número de indicadores a considerar como el esfuerzo cognitivo de recordar y sopesar sus valores.

Las propiedades periódicas se utilizan de manera común en química para hacer predicciones sobre las propiedades de las sustancias químicas, pero algunos de los alumnos entrevistados tendieron a sobregeneralizar su aplicación. Tal y como fue el caso con el heurístico de *Representatividad*, este atajo cognitivo fue utilizado con frecuencia en combinación con otras estrategias, tales como *Reconocimiento* y *Una-Razón-Basta*. Su uso parece depender de la estructura de las sustancias comparadas, siendo más frecuente cuando la única diferencia entre los compuestos es la presencia de un solo tipo de átomo (p. ej., MgO y BaO). Esta estructura en la pregunta parece reforzar la idea de que las diferencias pueden ser explicadas en función de

las propiedades de los átomos individuales. Muchos de los estudiantes que utilizaron esta estrategia reconocieron la arbitrariedad de sus decisiones y la posibilidad de otras secuencias alternativas, pero sin poner en duda la existencia de una propiedad periódica subyacente. Dada la arbitrariedad del tipo y la direccionalidad de la propiedad periódica invocada por este heurístico, su aplicación introduce una gran variabilidad en las respuestas de diferentes estudiantes, aun cuando utilicen el mismo atajo cognitivo.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El objetivo central de este trabajo ha sido el de ilustrar en qué medida el razonamiento de los estudiantes de ciencias, en particular de los alumnos de química, puede estar restringido por *suposiciones implícitas* sobre las propiedades y el comportamiento de las entidades en un sistema, o por atajos de razonamiento (*heurísticos*) que les ayudan a disminuir el esfuerzo cognitivo. Los resultados de nuestras investigaciones indican de manera consistente que, aun a nivel universitario, el pensamiento de los estudiantes está dominado por conocimientos y formas de razonamiento intuitivos. Desde esta perspectiva, cualquier agenda educativa que se privilegie debe reconocer la importancia de crear oportunidades en el aula para cuestionar y reflexionar sobre los alcances y limitaciones de estas formas de pensar.

Es necesario invertir gran parte de nuestros esfuerzos educativos en ayudar a los estudiantes a mejorar sus habilidades para construir argumentos, explicaciones, predicciones e inferencias más sólidas, plausibles y válidas desde la perspectiva científica. Diferentes autores han propuesto variadas estrategias con este fin. Por ejemplo, Grotzer (2003) y Perkins y Grotzer (2005) han demostrado los efectos positivos de involucrar a los estudiantes en experiencias de exploración inquisitiva, prestando particular atención a la manera en que los estudiantes generan modelos causales y motivando el desarrollo, discusión y

reflexión sobre diferentes tipos de modelos. Slotta y Chi (2006) han demostrado que el entrenamiento explícito de los estudiantes en el reconocimiento de los atributos básicos de diferentes tipos de propiedades y procesos (p. ej., aditivos, emergentes) promueve aprendizajes más significativos. Por su parte, Wilenski y Resnick (1999) y Jacobson y Wilenski (2006) han ilustrado el poder que tienen las simulaciones computacionales interactivas para ayudar a los estudiantes a visualizar y reconocer los factores relevantes que determinan las propiedades y el comportamiento de sistemas simples y complejos. Es en esta última dirección en la que nosotros hemos invertido nuestros mayores esfuerzos educativos, a través del diseño y creación de gran variedad de herramientas didácticas interactivas que estudiantes y profesores pueden utilizar dentro y fuera del aula de clases (Pollard y Talanquer, 2005).

Todas estas estrategias para mejorar y diversificar el tipo, la calidad y el contenido del razonamiento de los estudiantes de ciencias resaltan la importancia de despertar tanto su conciencia metacognitiva sobre la naturaleza, alcances y limitaciones de diferentes formas de razonamiento, como su habilidad para interceder metacognitivamente en su razonamiento y controlar, reducir o inhibir la influencia del pensamiento intuitivo o heurístico (Klaczynski, 2004). En este sentido, los maestros de ciencias a todos niveles deberían reconocer tanto la necesidad de que los estudiantes experimenten, analicen y reflexionen sobre diferentes formas de modelar, explicar y argumentar en ciencias, como la importancia de explorar y caracterizar las suposiciones implícitas y los heurísticos que guían su razonamiento en diferentes contextos.

AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera reconocer el trabajo y colaboración de Jenine Maeyer cuya investigación de doctorado sobre la identificación de heurísticos utilizados por estudiantes de química en tareas de comparación ha permitido dar forma a varias de las ideas presentadas en este artículo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAAS (1989). *Science for all Americans*. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science.
- ANDERSSON, B. (1986). The experimental gestalt of causation: a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8(2), pp. 155-171.
- BLACK, P. y ATKIN, J. M. (1996). *Changing the subject: Innovations in science, mathematics and technology education*. New York, NY: OECD/Routledge.
- CHI, M.T.H. (2008). Three kinds of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and ontological shift. In S. Vosniadou (ed.) *International handbook of research on conceptual change*, pp. 61-82. Nueva York, NY: Routledge.
- diSESSA, A.A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10, pp. 165-255.
- DRIVER, R., GUESNE, E. y TIBERGHIE, A. (1995). *Children's Ideas in Science*. Buckingham, England: Open University Press.
- DUIT, R. (2007). *Bibliography STCSE: Students' and teachers' conceptions and science education*. Leibniz Institute for Science Education: Kiel, Germany: IPN. Available at <www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/>.
- EINHORN, H.J. y HOGARTH, R.M. (1986). Judging probable cause. *Psychological Bulletin*, 99(1), pp. 3-19.
- EVANS, J.S.B.T. (2006). The heuristic-analytic theory of rea-

- soning: Extension and evaluation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3) pp. 378-395.
- EVANS, J.S.B.T. (2008) Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition, *Annual Review of Psychology*, 59, pp. 255-278.
- FISCHBEIN, E. (1987). *Intuition in science and mathematics: An educational approach*. Dordrecht: Reidel.
- GELMAN, R. (1990). First principles organize attention to and learning about relevant data: Number and the animate-inanimate distinction as examples. *Cognitive Science*, 14(1) pp. 79-106.
- GELMAN, R. y WILLIAMS, E. (1998). Enabling constraints for cognitive development and learning: Domain specificity and epigenesis, en Kuhn, D. and Siegler, R. (eds.). *Cognition, perception and language*. Vol. 2. Handbook of Child Psychology (Fifth Ed), pp. 575-630. Nueva York: John Wiley and Sons.
- GIGERENZER, G. y SELTEN, R. (2001). *Bounded rationality: The adaptive toolbox*. Cambridge, Ma: The MIT Press.
- GILOVICH, T., GRIFFIN, D. y KAHNEMAN, D. (eds.) (2002). *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- GOLDSTEIN, D.G. y GIGERENZER, G. (2002). Models of ecological rationality: The recognition heuristic. *Psychological Review*, 109(1), pp. 75-90.
- GROTZER, T.A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. *Studies in Science Education*, 39, pp. 1-74.
- GUTIERREZ, R. y OGBORN, J. (1992). A causal framework for analyzing alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), pp. 201-220.
- HATANO, G. e INAGAKI, K. (2000). Domain-specific constraints on conceptual development. *International Journal of Behavioral Development*, 24(3), pp. 267-275.
- JACOBSON, M.J. y WILENSKY, U. (2006). Complex systems in education: Scientific and educational importance and implications for the learning sciences. *The Journal of the Learning Sciences*, 15(1), pp. 11-34.
- KLACZYNSKI, P. A. (2004). A dual-process model of adolescent development: Implications for decision making, reasoning, and identity, en Kail, R.V. (ed.). *Advances in child development and behavior*, pp. 73-123, San Diego, CA: Academic Press.
- KEIL, F.C. (1990). Constraints on constraints: Surveying the epigenetic landscape, *Cognitive Science*, 14(1), pp. 135-168.
- MILLAR, R. y OSBORNE, J. (eds.) (1998). *Beyond 2000: Science education for the future. The report of a series funded by the Nuffield Foundation*. Londres: King's College London.
- PERKINS, D.N. y GROTZER, T.A. (2005). Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, 41, pp. 117-166.
- POLLARD, J. y TALANQUER, V. (2005) Interactive Digital Overheads: Dynamic teaching tools for the chemistry classroom. *The Chemical Educator*, 10, pp. 36-40.
- POZO, J.I. y GÓMEZ CRESPO, M.A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia [Teaching and Learning Science.]* Madrid: Morata.
- REDISH, E.F. (2004). A Theoretical Framework for Physics Education Research: Modeling student thinking, en Redish, E.F. and Vicentini, M. (eds.). *Proceedings of the International School of Physics, «Enrico Fermi» Course CLVI*, Amsterdam: IOS Press.
- RESNICK, M. (1994). *Turtles, termites, and traffic jams: Explorations in massively parallel microworlds*. Cambridge, MA: MIT Press.
- SEBASTIÀ, J.M. (1989). Cognitive constraints and spontaneous interpretations in physics. *International Journal of Science Education*, 11(4), pp. 363-369.
- SHAH, A.K. y OPPENHEIMER, D.M. (2008). Heuristics made easy: An effort-reduction framework. *Psychological Bulletin*, 134(2), pp. 207-222.
- SLOMAN, S.A. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin*, 119(1), pp. 3-22.
- SLOTTA, J.D. y CHI, M.T.H. (2006). Helping students understand the challenging topics in science through ontology training. *Cognition and Instruction*, 24, pp. 261-289.
- STAINS, M. y TALANQUER, V. (2007). Classification of Chemical Substances using Particulate Representations of Matter: An analysis of student thinking. *International Journal of Science Education*, 29(5) pp. 643-661.
- STAINS, M. y TALANQUER, V. (2008). Classification of Chemical Reactions: Stages of Expertise. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(7), pp. 771-793.
- STAVY, R. y TIROSH, D. (2000). *How students (mis-)understand science and mathematics: Intuitive rules*. Nueva York: Teachers College Press.
- TALANQUER, V. (2006). Commonsense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), pp. 811-816.
- TALANQUER, V. (2008). Students' Predictions about the Sensory Properties of Chemical Compounds: Additive versus Emergent Frameworks. *Science Education*, 92(1), pp. 96-114.
- TALANQUER, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of «structure of matter», *International Journal of Science Education*, (in press).
- TODD, P.M. y GIGERENZER, G. (2000). Precipitous simple heuristics that make us smart. *Behavioral and Brain Sciences*, 23, pp. 727-780.
- VIENNOT, L. (2001). *Reasoning in Physics: The Part of Common Sense*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- VOSNIADOU, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, pp. 45-69.
- WELLMAN, H.M. y GELMAN, S. (1998). Knowledge acquisition in foundational domains, en Kuhn, D. y Siegler, R. (eds.). *Cognition, perception and language*. Vol. 2. Handbook of Child Psychology (Fifth Ed), pp. 523-573. Nueva York: John Wiley and Sons.

[Artículo recibido en julio de 2009 y aceptado en febrero de 2010]

Intuitive Thinking in Chemistry: Implicit Assumptions and Heuristics

TALANQUER, VICENTE

Department of Chemistry and Biochemistry. University of Arizona, Tucson
vicente@u.arizona.edu

Summary

Many students have serious difficulties understanding and applying core chemical ideas and ways of thinking to build explanations and make predictions about the properties of diverse chemical systems. These problems seem to be related to the existence of cognitive constraints that guide and facilitate their reasoning but also restrict its range. Reasoning in a given area seems to involve the activation of a spectrum of cognitive constraints which are satisfied simultaneously as well as they can be. These constraints allow us to make reasonable, adaptive inferences about the world given limited time and knowledge. They often generate acceptable answers with little effort, but sometimes lead to severe and systematic biases and errors.

In our work we have argued that core learning constraints in chemistry can be conceived as sets of interrelated *implicit assumptions* about the properties of chemical substances and processes, together with *heuristic reasoning strategies* to make quick predictions and decisions. Results from our research consistently suggest that, even at the college level, students' thinking is largely controlled by these types of cognitive constraints. The central goal of this work is to illustrate how cognitive constraints influence students' explanations and predictions of chemical properties and phenomena. In particular, we summarize the results of two research studies, one focused on the analysis of the nature of the explanations generated by college chemistry students to account for the colligative properties of solutions, while the other explored students' rankings of different chemical substances based on the predicted value of a physical or chemical property.

For our first study, explanations were collected in written form using two different quizzes that students completed at the end of a two-semester general chemistry course. The analysis of the types of causal explanations built by the study participants indicated that students seem to be biased towards some causal models or explanatory modes characterized as causal-additive and causal-static in our work. For example, in the case of boiling-point elevation, over 40% of the students created causal-additive explanations in which the physical and chemical properties of substances and mixtures were conceived as the result of a weighted average of the properties of their individual components. In a similar way, the dominance of causal-static explanations is indicative of an inclination to rely on static agents that can exert forces on the entities in their surroundings as a way to justify change. This type of centralized deterministic model of causal agency has

been identified by a variety of authors as characteristic of novice learners' reasoning. A large proportion of the participants built non-causal teleological explanations to account for osmotic flow. The central role that teleological explanations played in students' accounts for this phenomenon may indicate that they intuitively assign a causal role to the perceived goals or purposes of objects and events.

The goal of our second study was to investigate the reasoning heuristics used by college chemistry students when ranking chemical substances based on the relative value of a physical or chemical property. For this purpose, a mixed-methods research study was completed based on quantitative results collected using a ranking-task questionnaire and qualitative data gathered through semi-structured interviews. Our results revealed that many study participants relied frequently on one or more of the following heuristics to make their decisions:

- *Recognition*: the decision is based on the recognition of an object, which is assumed to have the highest value with respect to the relevant criterion.
- *Representativeness*: the decision is made assuming commonalities between objects of similar appearance.
- *One-reason decision making (ORDM)*: the decision is based on the first cue that favors one alternative over the others.
- *Periodic trend*: the decision is made, in this domain-specific heuristic, based on the relative position of the composing atoms on the Periodic Table without further justification.

Of these heuristics, the domain-general strategies of *recognition* and *ORDM* were the most commonly used by our interviewees, although their application depended on specific task features. These heuristics allowed students to generate answers in the absence of requisite knowledge; unfortunately, they often led students astray.

The results of our work indicate that the characterization of students' intuitive thinking is of central importance in the development of curriculum and teaching strategies that better support student learning in science, as well as in the design of assessment tools to gather valid evidence of student understanding. Our results also suggest the need to create more opportunities for college chemistry students to monitor their thinking, develop and apply analytical ways of reasoning, and evaluate the effectiveness of their implicit assumptions and short-cut reasoning procedures in different contexts.